

## Partial Translation of Metallurgical Plasticity Processing

Page 4, lines 2-6

As for classification of metallurgical plastic processing, it can be classified, according to the processing temperature, into hot-work and cold-work as well as hot cold-working, or, according to the material and shape of the product, into sheet metal processing, corrugation processing, rod and pipe processing. However, classification in this book is conducted according to the stress type during processing as the basic deformation mechanism as Kienzle and Thomsen used in classification and classify into four types consisting of compression, tension, bending and shearing.

Page 10, lines 2-7

### 1.3.2 Plastic Deformation of Single Crystal

When an external force is applied to a metal crystal having a regular atomic arrangement, the crystal deforms elastically at first, and when the stress reaches at the critical value, a plastic deformation is formed. The elastic deformation is a deformation in which the lattice configuration is changed in proportion to the stress and it returns to the original configuration as the stress is removed. The plastic deformation is generated by a relative shift of atoms on both sides of an atomic plane along the atomic plane. The most typical shift is a slipping phenomenon in which atoms slip along a particular atomic plane referred to as a slip plane in a particular direction referred to as a slip direction over an integer-time of atomic interval, which is referred to as a slip deformation.

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

金属工学標準教科書

# 金属塑性加工学

加藤健三著

丸善株式会社



## 1. 金属塑性加工の基礎

は、それぞれの専門書にまかせたい。

さて、金属塑性加工の分類については、加工温度から見ると熱間加工および冷間加工、さらに温間加工に分類され、素材や製品の形状からは板材加工、形材加工、棒材や管材加工にもわけられるが、ここでは Kienzle や Thomsen らが分類に用いているように、基本的な変形機器として加工中の応力形式を考え、圧縮、引張り、曲げ、せん断の 4 種類にわけることとする。

### 1・2 金属塑性加工の工業における位置

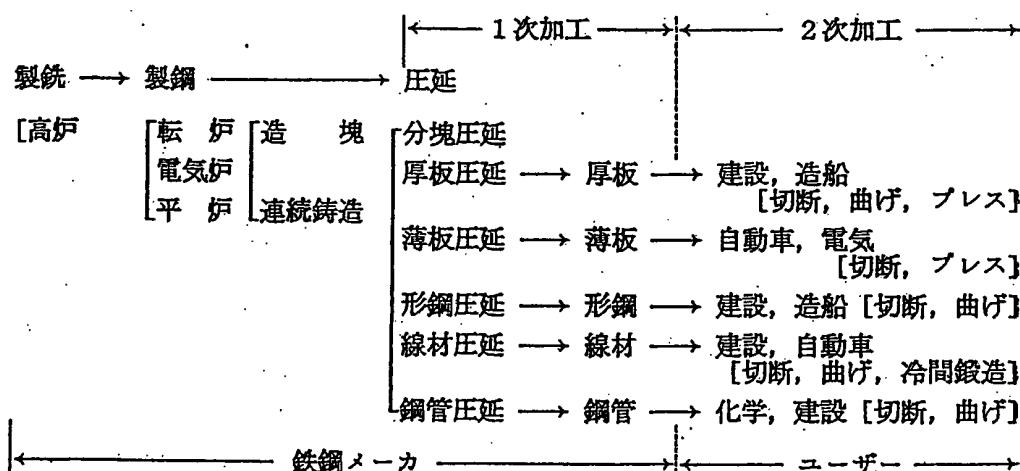
塑性加工は金属素材を塑性変形によって目的の形状に変化させる金属加工法であり、切削加工のような切りくずが生じないことが特徴で、切削加工に対して非切削加工とよぶこともできる。一般に金属加工技術としては、铸造、塑性加工、溶接、切削、研磨、電解加工、焼結などが考えられるが、目的の製品を製造するためにどの方法を使用すれば技術的、経済的に最も有効であるかということが重要で、それぞれの特徴をよく理解して適用することが必要である。この意味では、塑性加工は同一形状の製品を多量に生産するのに適しており、原材料の 1 次加工から最終製品の 2 次加工にいたるまで広い範囲で利用され、従来、切削加工によっていたものが順次、塑性加工に移って経済的に有利になった例も多い。ここで金属工業の立場から塑性加工の工業における位置を考えてみたい。

鉄鋼業を例にとると、高炉による製銑および転炉や電気炉による製鋼の過程を経て、鋼塊ができると、それ以後は市場において販売するための鉄鋼製品の製造過程に入る。そして、その主力となる加工技術が圧延を中心とした塑性加工である。製銑および製鋼の過程がより集約的でまとまっているのに対して、圧延の過程は厚板、薄板、形鋼、線材、钢管など各種の鉄鋼製品を得るために、きわめて広範囲に分岐された製造過程を必要とする。そして、分岐されたそれぞれの加工の過程から生じた製品が建設、造船、化学、自動車、電機などの各産業分野に利用されてゆく。それらユーザーにおいても、他の金属加工法とともにプレスなどの塑性加工が用いられ、最終製品が組立てられる。すなわち、金属工業における塑性加工とユーザーにおける塑性加工の結びつきが生ずるわけで、前者を 1 次加工、後者を 2 次加工とよぶことが多い。この関係を鉄鋼業—自動車工業について考えてみたい。

鉄鋼業において鋼塊から分塊圧延機、ホットストリップミルを経てホットコイルをつくり、酸洗、コールドストリップミル、焼なまし、テンパー ミルを経て冷延コイルが得ら

れ、鋼板メーカーとしての製品の検査を行なって、ユーザーとしての自動車メーカーに納入する。ユーザーとしては、冷延コイルをレペラおよびシャーにかけて平坦なプレス用原板とし、各プレスラインにおいて、第1しづり、第2しづり、トリミング、レストライクを経て自動車組立てのための車体プレス部品ができる。また、線材・丸棒についても鉄鋼業において分塊、線材圧延機、熱処理を経て、バーインコイルとして自動車メーカーに納入され、潤滑処理を行なって切断し、冷間鍛造プレスにより車軸その他の部品を製造する。それ以後は溶接、組立、塗装の過程に入る。

以上のように、塑性加工技術は鉄鋼メーカーの後半と自動車メーカーの前半を連結している存在であり、1次加工→2次加工→最終製品の流れの主力となっている。これら1次加工・2次加工の関連性はアルミニウム、銅などの非鉄金属工業においても同様である。



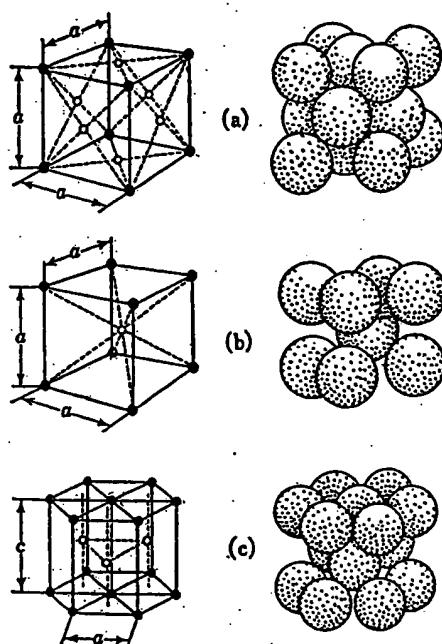
### 1·3 金属学的基礎

### 1・3・1 金属の結晶構造

現実に見られる純金属は多くの細かい結晶の集合で、多結晶体をなしている。それぞれの結晶粒の中では原子は規則正しい配列をしており、いわゆる空間格子を形成し、単結晶である。金属の原子配列には面心立方格子(f.c.c.)、体心立方格子(b.c.c.)、最密六方格子(c.p.h.)などがあり、単位格子を取り出すと図1・1のようになる。表1・3は代表的な金属の結晶構造および格子定数を示す。

### a. ミラー指數

結晶格子は各種の原子列または原子面をもっており、その結晶が変形する場合に重要な



(a) 面心立方格子, (b) 体心立方格子,  
(c) 最密六方格子

図 1・1 純金属の結晶構造(単位格子)

役割をはたす。そこでそれらの列(または方向)および面を表示するためにミラー指数が用いられる。ミラー指数はつきのようにして求められる。

**立方格子の場合** 単位格子の1つの格子点を原点とし、3つの主軸を座標軸とする( $X, Y, Z$ )座標をつくり、問題の面が3つの座標軸を切る交点の座標を単位格子の辺の長

さ、すなわち格子定数 $a$ を単位として表わす。たとえば図1・2のように $X$ 軸を1,  $Y$ 軸を2,  $Z$ 軸を3で切ったとする。この逆数 $1, 1/2, 1/3$ をとり、分母の最小公倍数を乗じて同じ比の最小の整数比になおすと、 $6, 3, 2$ となる。これがこの面のミラー指数で、(632)で表わされる。平行な面のミラー指数は同じである。

図1・3に結晶塑性学で重要な低指数面を示す。また(100), (010), (001)は平行ではないが、結晶学的には等価であるから、ひとまとめにして{100}と表わ

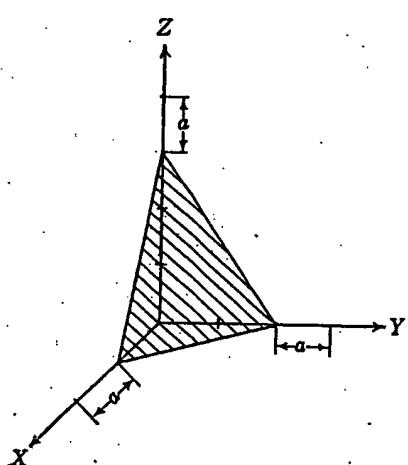
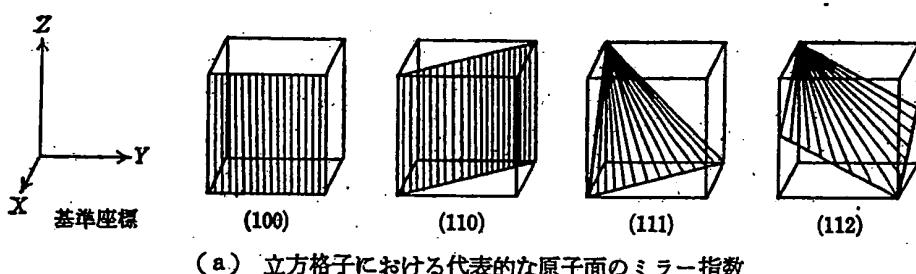


図 1・2 面の表わし方(立方格子) す。つぎに方向を表わすには原点をとおるその方向に平行な直線を引き、その直線が最初に交わる格子点(立方体の頂点)の座標を単位格子の辺の長さを単位として表わせばよい。面と区別するためには、たとえば[110]のように

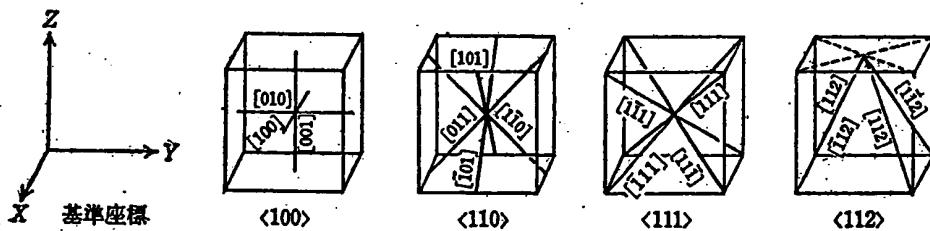
表 1・3 純金属の結晶構造および格子定数

| 元 素                    | 結 晶 構 造  | 格 子 定 数          |       | 備 考        |
|------------------------|----------|------------------|-------|------------|
|                        |          | $a [\text{\AA}]$ | $c/a$ |            |
| Cu                     | f. c. c. | 3.6153 (20)      |       |            |
| Ag                     | f. c. c. | 4.0856 (20)      |       |            |
| Au                     | f. c. c. | 4.0783 (20)      |       |            |
| Al                     | f. c. c. | 4.0490 (20)      |       |            |
| Pb                     | f. c. c. | 4.9495 (20)      |       |            |
| Ni                     | f. c. c. | 3.5238 (20)      |       |            |
| Be                     | c. p. h. | 2.2854 (20)      | 1.568 |            |
| Mg                     | c. p. h. | 3.2092 (20)      | 1.623 |            |
| Zn                     | c. p. h. | 2.664 (—)        | 1.856 |            |
| Cd                     | c. p. h. | 2.9787 (20)      | 1.886 |            |
| Ti <sup>(\alpha)</sup> | c. p. h. | 2.9504 (25)      | 1.587 | <880°C     |
| Ti <sup>(\beta)</sup>  | b. c. c. | 3.33 (900)       |       | >880°C     |
| Zr <sup>(\alpha)</sup> | c. p. h. | 3.230 (—)        | 1.592 | <862°C     |
| Zr <sup>(\beta)</sup>  | b. c. c. | 3.62 (867)       |       | >862°C     |
| V                      | b. c. c. | 3.039 (20)       |       |            |
| Nb                     | b. c. c. | 3.3007 (—)       |       |            |
| Cr                     | b. c. c. | 2.8845 (20)      |       |            |
| Mo                     | b. c. c. | 3.1466 (20)      |       |            |
| W                      | b. c. c. | 3.1648 (20)      |       |            |
| Fe <sup>(\alpha)</sup> | b. c. c. | 2.8664 (20)      |       | <910°C     |
| Fe <sup>(\gamma)</sup> | f. c. c. | 3.656 (950)      |       | 910~1400°C |
| Fe <sup>(\delta)</sup> | b. c. c. | 2.94 (1425)      |       | >140°C     |

f. c. c.: 面心立方格子, c. p. h.: 最密六方格子, b. c. c.: 体心立方格子,  
格子定数  $a$  のつぎの ( ) 内の数字は測定温度 [°C]



(a) 立方格子における代表的な原子面のミラー指数



(b) 立方格子における代表的な方向のミラー指数

図 1・3 立方格子のミラー指数

### 1. 金属塑性加工の基礎

表わす。等価の方向に対しては  $\langle 110 \rangle$  のように示す。立方格子では  $[kh\ell]$  方向は  $(hkl)$  面に垂直な方向である。

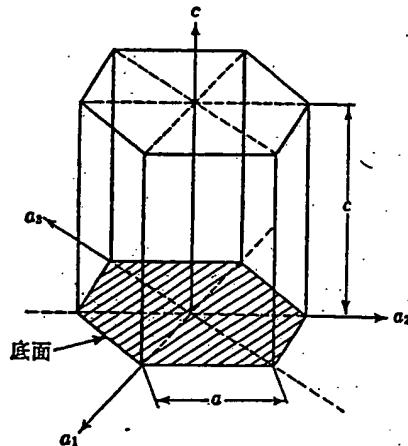
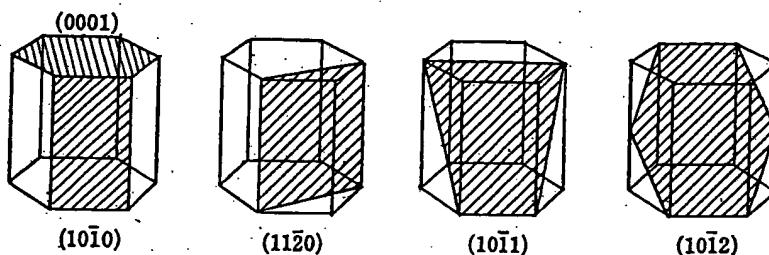
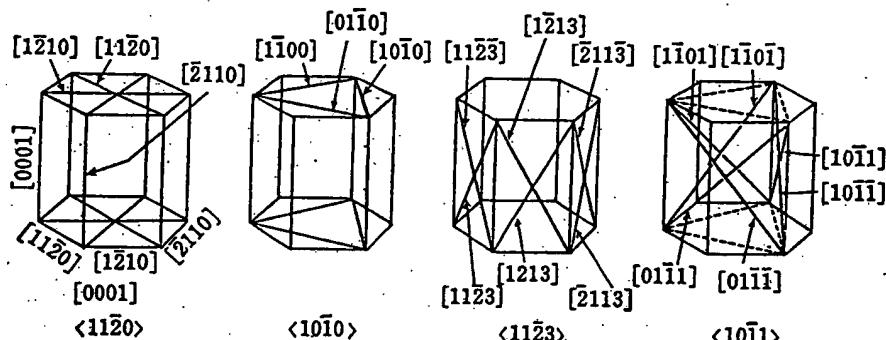


図 1・4 最密六方格子の基礎座標

最密六方格子の場合 六方格子の主軸は 4 本あるので、図 1・4 のように底面上の 3 つの主軸と縦の中心軸を座標軸とする ( $a_1, a_2, a_3, c$ ) 座標をつくり、問題の面が 4 本の座標軸を切る交点の座標を単位格子の辺の長さ (格子定数  $a$  および  $c$ ) を単位として表わし、ミラー指数と同じ操作で面の指数を決める。その結果は  $(hki\ell)$  で表わされるが、 $i = -(h+k)$  の関係がある。図 1・5 は結晶学的に重要な低指数面および代表的な方向の指数を示す。



(a) 最密六方格子における代表的な原子面のミラー指数



(b) 最密六方格子における代表的な方向のミラー指数

図 1・5 最密六方格子のミラー指数

### b. 結晶格子の不完全性

実在金属の結晶格子は完全な空間格子ではなく、つぎに示すような格子欠陥をもっている。

#### (1) 点状の欠陥として原子空孔、格子間原子、不純物原子

## (2) 線状の欠陥として転位

## (3) 面状の欠陥として積層欠陥

原子空孔は結晶格子点に原子があるべきなのに実際にはないところを指す。格子間原子は結晶格子点の中間のすき間にに入った原子を指す。これらの欠陥は熱的な平衡状態で安定に存在し、高温になるほど安定である。しかし平衡濃度はきわめて小さく、空孔の濃度は Cu の場合に  $0^{\circ}\text{C}$  で  $10^{-18}$ ,  $1000^{\circ}\text{C}$  で  $10^{-4}$  程度であり、格子間原子の濃度は  $0^{\circ}\text{C}$  で  $10^{-67}$ ,  $1000^{\circ}\text{C}$  で  $10^{-15}$  程度で空孔よりも小さい。不純物原子は格子の間にわり込む形式の侵入形と格子点で置きかわる形式の置換形があり、侵入形原子は直径の小さな原子 ( $1\text{\AA}$  以下) で H, B, C, N, O などである。以上の点欠陥の周囲では一般に格子はひずんでおり、応力場が形成されている。

転位はある原子面に沿ってその一部分だけに切れ目を入れ、切れ目の両側の原子面を 1 原子間隔だけ相対的にずらし、空げきができればそこに原子面を補充してやり、重なりができるれば重なった原子面を取り去ってやった後、再び切れ目を接合したとき、切れ目を入れた部分と、入れない部分の境界線に沿って形成される線状の欠陥を指している。この切れ目の境界線を転位線とよび、切れ目の両側の原子面の相対的ずれをバーガース・ベクトルという。転位線の方向とバーガース・ベクトルの方向は任意にえらべるが、両者が直交するような転位を刃状転位、平行な転位をらせん転位という。一般の転位はこれらの混合したものと考えられるので、混合転位という。図 1・9 は刃状転位、図 1・10 はらせん転

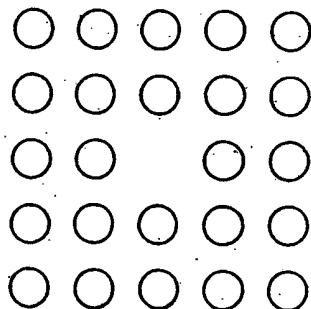


図 1・6 原子空孔

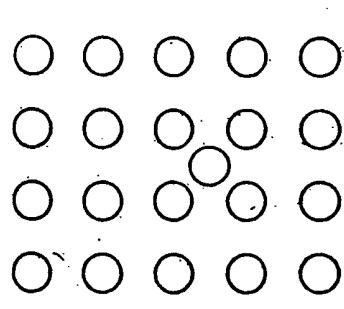


図 1・7 格子間原子

位を示す。転位はほとんど溶融金属から結晶が晶出する場合または結晶が塑性変形をうける場合に形成される。

積層欠陥は原子密度の高い原子面にしばしば形成される欠陥で、原子面の上に新しい原子面が規則正しく積み重なることによって結晶が成長する場合、何かの理由でその規則性が破られた個所である。

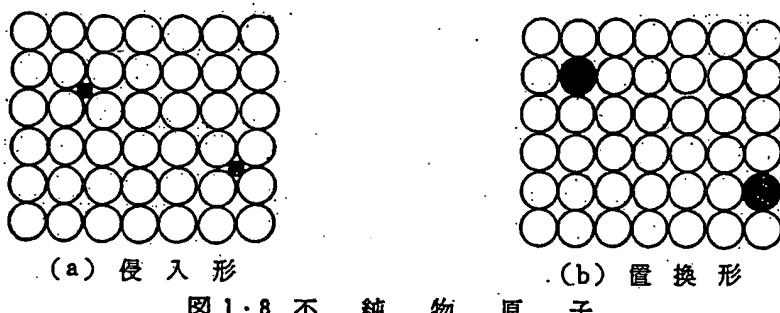


図 1・8 不純物原子

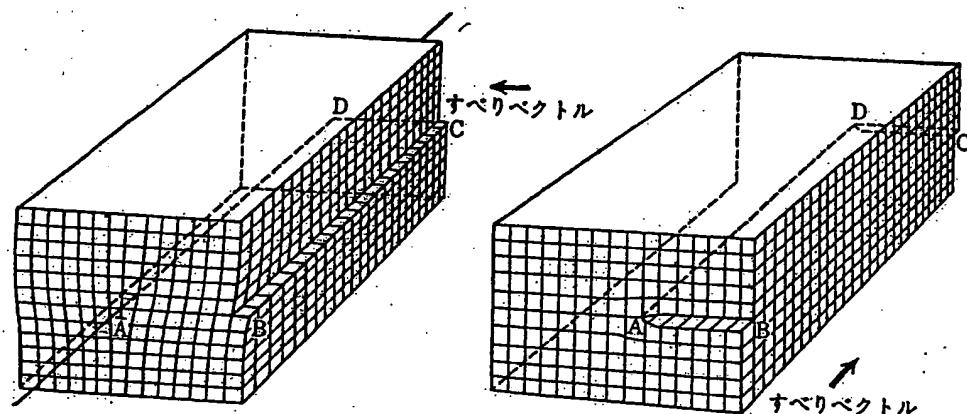


図 1・9 刃状転位の発生

図 1・10 らせん転位の発生

### 1・3・2 単結晶の塑性変形

規則的な原子配列によってできている金属結晶に外力を加えると、結晶ははじめ弾性的に変形し、応力が限界値に達すると塑性変形を生ずる。弾性変形は格子の形状が応力に比例して変化し、応力を除去するともとの形状にもどるような変形であるが、塑性変形は一定の原子面にそって、その両側の原子が相対的にずれることによって生ずる。最も一般的なずれは、すべり面とよばれる特定の原子面にそって、すべり方向とよばれる特定の方向に、原子間隔の整数倍だけすべる現象で、すべり変形という。もう1つのずれは、双晶面とよばれる原子面にそって、上の面が下の面に対して一定量ずつぎつぎとずれ、その結果、変形領域の原子配列が未変形領域の原子配列に対し、ちょうど鏡影の関係になるもので双晶変形という。双晶変形は鏡影の関係になるという制約のため、大きな塑性変形をすることができないが、すべり変形は大きな塑性変形が可能である。多くの金属は主としてすべり変形によって変形することが多いので、塑性変形においてすべり変形は双晶変形よりはるかに重要である。

すべり変形におけるすべり面は、一般に最も密に原子が存在する面であり、すべり方向

は最も密に原子が並んでいる方向である。したがって面心立方金属では  $\{111\}$  面がすべり面であり、 $<110>$  方向がすべり方向である。体心立方金属ではすべり面は  $\{110\}$  面であるが、これ以外に  $\{112\}$ ,  $\{123\}$  面でもしばしばすべりを生ずる。すべり方向は  $<1\bar{1}1>$  方向である。最密六方金属はすべり面は底面の  $(0001)$  面であり、すべり方向は  $<11\bar{2}0>$  方向である。

すべり面とそれぞれのすべり面上のすべり方向を合わせて考えると、幾通りもの可能なすべり方が考えられるが、この組合せをすべり系といふ。面心立方では 4 個の  $\{111\}$  面すなわち  $(111)$ ,  $(\bar{1}\bar{1}1)$ ,  $(1\bar{1}\bar{1})$ ,  $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$  の各面上に 3 個の  $<101>$  方向があるから、すべり系は 12 個になる。同様にして最密六方は 3 個、体心立方は 48 個のすべり系がある。

すべり系は少ないとき当然すべり変形には都合が悪くなる。最密六方金属が立方金属よりも一般に塑性変形しにくいのはこのためである。

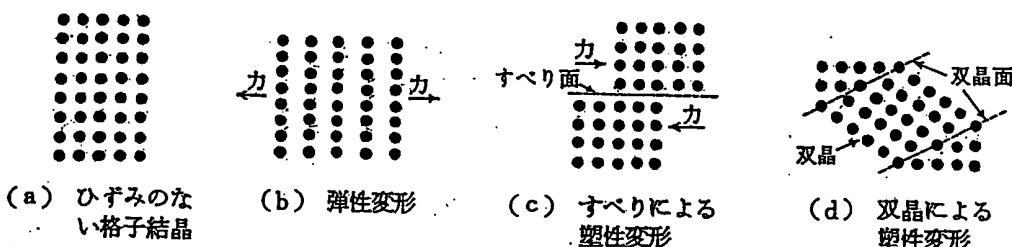


図 1・11 結晶格子の弾性変形と塑性変形

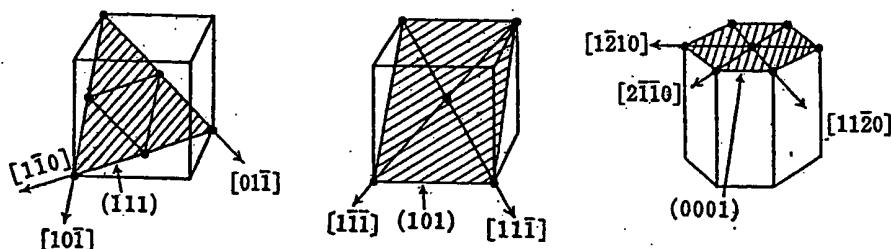


図 1・12 面心立方格子、体心立方格子、および最密六方格子のすべり面とすべり方向 (・印は原子の中心)

丸棒状の単結晶を引張ると、その方位すなわち引張方向のミラー指数によってすべりを開始するときの引張応力(降伏応力)はいろいろの値となるが、活動したすべり面上で、活動したすべり方向へのせん断応力成分は一定である。この臨界せん断応力はその結晶の硬さに対応するもので、不純物、合金成分、化学組成、予ひずみ、熱履歴、温度、変形速度などによって変化する。単結晶の臨界せん断応力は多結晶金属材料の降伏応力(变形抵抗)と密接な関係にあり、多くの面心立方および最密六方純金属の単結晶の室温における臨界せん断応力は  $0.1 \text{ kg/mm}^2$  以下で、また純鉄単結晶の室温における値は  $5 \text{ kg/mm}^2$  程度である。

著者の現職  
大阪大学教授 工学博士

金属塑性加工学

￥ 2,500

昭和 46 年 6 月 25 日 発行

© 1971

著者 加藤 健三

発行者 司 忠

発行所 丸善株式会社

郵便番号 103 東京都中央区日本橋通 2 丁目 6 番地

印刷 中央印刷株式会社・製本 株式会社 松岳社

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**